

基于数据驱动与多变量优化的三菱 F 型燃气轮机高效运行控制研究

刘欢

深圳大唐宝昌燃气发电有限公司 158000

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17679

[摘要] 随着能源结构的转型与高效清洁能源技术的快速发展,燃气轮机在发电系统中的地位日益重要。三菱 F 型燃气轮机以其高功率密度和优良的燃烧性能被广泛应用,但在多工况下的运行中仍存在效率提升困难、排放控制不足和动态响应滞后等问题。本文针对上述挑战,提出了一种基于数据驱动与多变量参数优化的高效运行控制策略。研究从多变量参数敏感性分析入手,建立数据驱动的动态调节模型,结合热效率优化目标函数和滚动调整机制,形成了智能化动态优化控制体系。仿真结果表明,该方法可显著提升燃气轮机的热效率与动态响应能力,并有效降低排放水平。该研究为燃气轮机的高效、稳定与智能化运行提供了可行路径和技术支撑。

[关键词] 三菱 F 型燃气轮机; 多变量优化; 数据驱动; 动态控制; 热效率提升

1 引言

燃气轮机作为联合循环发电系统的核心设备,其运行效率和动态响应性能直接影响发电厂的经济性与环保水平。近年来,随着我国“双碳”战略目标的提出,燃气轮机高效运行技术成为研究热点。三菱 F 型燃气轮机具有先进的燃烧室设计和高压比特征,但在负荷变化和工况扰动下,其效率与排放指标易受多变量参数耦合影响,导致控制复杂性增加^[1]。

传统控制方式主要依赖固定模型或经验参数调整^[2],难以适应实时变化的工况需求。而基于数据驱动的智能控制与多变量参数优化技术,能够在保证燃烧稳定性的前提下实现热效率最大化与动态调节的自适应响应,成为新一代燃气轮机控制系统的重要方向^[3]。

本文针对三菱 F 型燃气轮机在多工况下的运行优化问题,提出一种结合多变量参数敏感性分析与数据驱动控制的整体优化框架。研究旨在解决系统效率提升受限、排放控制不足以及动态响应滞后的难题,构建适用于复杂工况的动态调节模型,实现热效率提升与智能优化控制的统一。

2 多变量参数敏感性分析与优化调节

2.1 参数敏感性分析模型

燃气轮机运行效率受多种参数影响,包括燃气温度 T_g 、压气机压比 π_c 、燃料当量比 ϕ 、导向叶片开度 α_v 、涡轮进口温度 T_{IT} 等。这些参数间存在显著耦合关系。为识别关键影响因子,本文采用 Sobol 全局敏感性分析方法,对典型工况下的效率响应进行分解。

系统响应模型可表示为: $\eta = f(T_g, \pi_c, \phi, \alpha_v, T_{IT})$

其中 η 为燃气轮机热效率。通过 Monte Carlo 随机采样与方差分解,得到各参数的敏感性指数 S_i 。结果表明,燃料当量比与导向叶片开度为影响效率的主要因素,累计贡献率超过 70%。

2.2 参数优化调节策略

基于敏感性结果,采用多目标粒子群优化算法 (MOPSO) 对关键参数进行动态寻优。优化目标函数定义为:

$$\max J = w_1 \eta - w_2 E_{NO_x} - w_3 F_c$$

其中 E_{NO_x} 为氮氧化物排放, F_c 为燃料消耗, w_1 为权重系数。通过引入约束条件 (燃烧稳定性、机组安全边界、负

荷波动限制)，达成效率与排放之间的多目标均衡。

仿真结果表明，优化之后燃气轮机热效率提高了 1.8%，NO_x 排放降低了约 9%，系统运行稳定性得到显著改善。

3 数据驱动的动态运行调节模型

3.1 模型结构设计

燃气轮机在实际运行中受到外界扰动与负荷波动影响，其系统特性呈现高度非线性。为实现实时动态优化，本文采用数据驱动建模方法，基于长短期记忆网络 (LSTM) 构建动态运行调节模型。

该模型输入历史运行参数序列 $X_t = [T_g, \pi_c, \phi, \alpha_v]$ ，输出预测的下时刻热效率与排放指标。

模型训练采用实际机组运行数据与仿真数据融合方式，损失函数为：

$$L = \sum (\eta_{pred} - \eta_{true})^2 + \lambda (E_{NO_x, pred} - E_{NO_x, true})^2$$

其中 λ 为正则化系数，用于平衡效率与排放目标。

3.2 动态调节策略

基于模型预测结果，设计滚动优化控制 (MPC) 策略。控制算法每隔 Δt 更新一次最优控制量 u_t ，并根据系统反馈进行在线修正，实现实时最优调节。

控制律如下：

$$u_t = \arg \min_u \int_t^{t+T_p} [(\eta_{ref} - \eta_{pred})^2 + \beta (E_{NO_x, pred} - E_{lim})^2] dt$$

其中 T_p 为预测时域 β 为排放权重系数。仿真结果表明，采用该策略后，系统在负荷快速变化 ($\pm 20\%$) 情况下仍能维持稳定，动态响应时间缩短约 35%，热效率波动幅度降低至 0.5%。

4 仿真验证与滚动调整机制

4.1 仿真平台构建

为验证所提出优化策略的可行性与成效，依托 MATLAB/Simulink 搭建三菱 F 型燃气轮机动态仿真平台。该平台涵盖压气机、燃烧室、燃气轮机、控制系统与排放模型五个子模块。

压气机模块运用多段多参数特性曲线拟合方法，考量进口温度与转速的耦合效应；

燃烧室模块依据能量守恒原理与燃烧方程构建热力模型，以计算燃烧温度与排放生成量；

燃气轮机模块借助经验修正的等熵膨胀方程求解功率输出与热效率；

控制模块实现多变量动态控制律，涵盖导向叶片角度控制、燃料流量调节、压气机出口温度限制等方面；

排放模块采用修正 Zeldovich 机理与经验排放因子计算 NO_x 排放量。

该仿真系统可实现负荷、环境温度、燃料流量等扰动条件下的动态运行模拟，准确反映实际工况特性。

4.2 滚动优化与动态调整机制

为进一步增强系统的实时性与鲁棒性，本文引入滚动优化调整机制其核心思想是：在运行过程中实时采集机组运行数据，利用数据驱动模型预测未来短期工况趋势，并在预测时域内滚动修正最优控制参数。

其算法流程如下：

实时数据采集：采集主要运行参数 $x_t = [T_g, \pi_c, \phi, \alpha_v]$

模型预测：LSTM 模型预测未来 T_p 时域内的热效率与排放变化；

滚动优化：在每个时间步 t ，求解最优控制向量 u_t^* ，并施加至系统；

反馈修正：采集实际输出 y_t ，修正模型误差，实现自适应迭代。

该机制能够借助滚动优化窗口的连续滑动达成在线学习与参数自修正，进而增强系统在复杂工况条件下的自适应能力。仿真结果显示，相较于传统 PID 控制，在 ROM 策略下，系统响应时间从 2.3 s 缩减至 1.5 s，燃气温度波动降低 42%，燃料利用率提升 2.1%。

4.3 多工况仿真验证

在满负荷 (100%)、中负荷 (70%) 及低负荷 (50%) 三

种典型工况下进行了验证:

工况	热效率提升 (%)	NO _x 下降 (%)	动态响应时间降低 (%)
满负荷	1.8	9.2	35.0
中负荷	2.3	11.5	38.4
低负荷	2.7	13.1	40.7

结果显示, 经过全面测试与验证, 该算法在涵盖所有可能工况的广泛范围内, 均展现出了极为出色的动态响应能力和卓越的稳定性表现。特别是在低负荷运行区域, 该算法对于排放控制的效果尤为显著, 能够有效降低污染物排放, 提升环保性能。这一系列测试结果充分表明, 所采用的优化策略不仅能够多种复杂工况下保持高效运行, 而且对于提升低负荷区域的排放控制水平具有显著优势, 从而验证了该策略在实际应用中具备广泛的适用性和强大的环境适应性。

5 结果分析与讨论

5.1 优化策略的综合效果

从仿真结果可知, 本文所提出的“多变量参数优化 + 数据驱动调节 + 滚动调整机制”三层结构在燃气轮机运行控制过程中达成了良好的协同效应。借助多变量参数的动态寻优、数据驱动模型的实时预测以及滚动调整机制的自适应调节, 该结构有效化解了传统控制方法中参数耦合复杂、响应滞后的难题, 具体表现如下: 能效提升成效显著, 系统热效率平均提高 2.1%, 燃料节约约 1.6%; 排放控制得以优化, NO_x 平均降低 10%, CO₂ 排放量下降约 1.5%; 动态性能有所改善, 系统调节时间缩短 35%, 超调量减少 25%。

此结果显示, 引入多变量优化与数据驱动的智能调节模型, 能够突破传统 PID 控制或经验控制的响应局限, 实现高效、清洁且智能化的运行。

5.2 模型泛化与工业应用可行性

为验证模型的可推广性, 将训练完备的模型应用于另一台 F 型机组的运行数据。结果表明, 其预测精度与控制效果和原模型的偏差不超过 3%, 这表明该模型具备良好的泛化能力。

此外, 该方案在实施过程中对现有控制系统的改动较小, 仅需在 DCS 层叠加数据采集与优化控制模块便可实现在线部署, 具有较强的工程可实施性。

未来, 在数字孪生与边缘计算平台的支撑下, 可进一步达成燃气轮机智能诊断[4]、预测性维护以及运行策略自主学习, 构建闭环优化体系[5]。

6 结论

(1) 本研究提出的基于数据驱动与多变量优化的三菱 F 型燃气轮机运行控制体系, 可有效提高系统热效率与动态响应性能。

(2) 借助 Sobol 敏感性分析与 MOPSO 优化算法, 确定燃料当量比与导向叶片开度为关键控制参数, 并构建了多目标热效率优化函数。

(3) 运用 LSTM 构建的数据驱动动态模型能够精准预测系统响应, 结合滚动优化机制达成了实时工况自适应调节。

(4) 仿真验证显示, 系统热效率提升约 2%, NO_x 排放降低 10%, 动态响应性能提高 35%, 具备显著的工程应用价值。

(5) 该研究为新一代燃气轮机智能优化控制提供了技术途径, 对构建高效、清洁、智能化电力系统具有重要意义。

[参考文献]

- [1] 王立军, 郭金富. 燃气轮机运行参数优化方法研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(6): 52-58.
- [2] 王志刚, 刘晓峰, 等. 燃气轮机智能控制系统综述[J]. 汽轮机技术, 2020, 62(3): 73-79.
- [3] 张建国, 陈涛. 多变量耦合条件下燃气轮机热效率分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 4892-4901.
- [4] Li X., Zhang Y. Data-driven dynamic optimization for gas turbine operation[J]. Applied Energy, 2023, 335: 120824.
- [5] GB 7713—1987 科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.